

# Document made available under the Patent Cooperation Treaty (PCT)

International application number: PCT/EP04/014365

International filing date: 16 December 2004 (16.12.2004)

Document type: Certified copy of priority document

Document details: Country/Office: DE  
Number: 103 59 415.9  
Filing date: 16 December 2003 (16.12.2003)

Date of receipt at the International Bureau: 24 February 2005 (24.02.2005)

Remark: Priority document submitted or transmitted to the International Bureau in compliance with Rule 17.1(a) or (b)



World Intellectual Property Organization (WIPO) - Geneva, Switzerland  
Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI) - Genève, Suisse

**BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND**EPO - Munich  
83  
11. Feb. 2005**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung  
einer Patentanmeldung****Aktenzeichen:**

103 59 415.9

**Anmeldetag:**

16. Dezember 2003

**Anmelder/Inhaber:**

Trimble Jena GmbH, 07745 Jena/DE

**Bezeichnung:**

Verfahren zur Kalibrierung eines Vermessungsgeräts

**IPC:**

G 01 C 1/04

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 1. Februar 2005  
Deutsches Patent- und Markenamt  
Der Präsident  
Im Auftrag

Stanschus

Patentanwälte  
**GEYER, FEHNERS & PARTNER (G.b.R.)**

European Patent and Trademark Attorneys

MÜNCHEN – JENA

Büro München / Munich Offices:

Perhamerstraße 31 · D-80687 München · Telefon: (089) 5 46 15 20 · Telefax: (089) 5 46 03 92 · e-mail: gefepat.muc@t-online.de

Büro Jena / Jena Offices:

Sellierstraße 1 · D-07745 Jena · Telefon: (036 41) 2 91 50 · Telefax: (036 41) 29 15 21 · e-mail: gefepat.jena@t-online.de

---

Trimble Jena GmbH  
u. Z.: Pat 9074/55 DE

Jena, den 16. Dezember 2003

### **Zusammenfassung**

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Kalibrierung eines mit einer Kamera mit ortsauflösendem Flächendetektor ausgestatteten Vermessungsgeräts. Dabei werden mit diesem Gerät vorgegebene Referenzpunkte angezielt, für jeden Referenzpunkt wird die Entfernung bestimmt und es werden in einer ersten Lage für verschiedene am Instrument einzustellende Winkelkombinationen von Horizontalwinkeln ( $H_z$ ) und Vertikalwinkeln ( $V_i$ ) jeweils die Bildkoordinaten des Bildes des Referenzpunktes in der Bildebene der Kamera bestimmt und gespeichert. Mittels eines Ausgleichsverfahrens anhand der gespeicherten Daten wird die Position der Kamera relativ zum Gerät bestimmt.

Bei einem solchen Verfahren wird für jede der Winkelkombinationen eine zweite Lage eingestellt: Das Gerät wird um 200 gon um eine vertikale Stehachse gedreht und auf einen Horizontalwinkel ( $H_{zII}$ ) eingestellt, die Kamera wird um eine horizontale Kippachse gedreht und auf einen Vertikalwinkel ( $V_{II}$ ) mit  $V_{II} = 400 \text{ gon} - V_i$  eingestellt. In der zweiten Lage werden ebenfalls die Bildkoordinaten des Referenzpunktes  $P_i$  bestimmt und gespeichert. Die Kalibrierung erfolgt unter Verwendung der für beide Lagen gespeicherten Daten.

Trimble Jena GmbH  
u.Z.: Pat 9074/55 DE

Jena, den 16. Dezember 2003

### Verfahren zur Kalibrierung eines Vermessungsgeräts

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Kalibrierung eines mit einer Kamera mit ortsauflösendem Flächendetektor ausgestatteten Vermessungsgeräts, bei dem mit dem Vermessungsgerät nacheinander vorgegebene Referenzpunkte  $P_i$  mit  $i=1, \dots, N$  und einer natürlichen Zahl  $N$ , angezielt werden, für jeden Referenzpunkt  $P_i$  die Entfernung bestimmt wird und in einer ersten Lage für verschiedene vorgegebene und am Vermessungsgerät einzustellende Winkelkombinationen von Horizontalwinkeln  $H_{z_i}$  und Vertikalwinkeln  $V_i$  jeweils die Bildkoordinaten des Bildes des Referenzpunktes  $P_i$  in der Bildebene der Kamera bestimmt und in Zuordnung zur jeweiligen Winkelkombination ( $H_{z_i}$ ,  $V_i$ ) gespeichert werden, und mittels eines Ausgleichungsverfahrens anhand der gespeicherten Daten die Position der Kamera relativ zum Vermessungsgerät bestimmt wird.

In der Vermessungstechnik werden zunehmend Videovermessungsgeräte, insbesondere Videotachymeter bzw. Videotheodoliten eingesetzt, d.h. Tachymeter oder Theodoliten, die statt mit einem Okular mit einer Kamera mit einem ortsauflösendem Flächendetektor ausgestattet sind. Mit der Verwendung solcher Kameras stellt sich auch das Problem der Kalibrierung, da die sogenannte innere und äußere Orientierung der Kamera unbekannt ist. Die innere Orientierung wird durch zwei orthogonal zueinander liegende Achsen in der Bildebene und einer im Ursprung senkrechten dazu durch einen Augpunkt bzw. ein Projektionszentrum  $O$ , in dem sich alle von Objektpunkten ausgehenden Strahlen schneiden, mit dem draus resultierendes Koordinatensystem definiert. Die relative Lage dieses Koordinatensystems zum Vermessungsgerätekoordinatensystem wird durch die äußere Orientierung beschrieben, welche drei Translationen und drei Rotationen berücksichtigt. Zwar wird die Kamera in der Regel annähernd optimal ausgerichtet sein, so daß die Senkrechte vom Projektionszentrum  $O$  auf die Bildebene mit der optischen Achse des Fernrohrsystems im Vermessungsgerät zusammenfällt, jedoch kommt es bei den genannten Vermessungsgeräten auf höchste Genauigkeit an, so daß z.B. Restjustierfehler eine Kalibrierung, d.h. die Bestimmung des Kameramo-

dells sowie der Lage der Kamera relativ zu dem Gerät, an das sie angebaut ist, erforderlich machen.

Zur Kalibrierung von Kameras an sich werden im Stand der Technik photogrammetrische Verfahren eingesetzt. Das heutzutage gängigste Verfahren der Kamerakalibrierung in der terrestrischen Photogrammetrie ist die sogenannte Simultankalibrierung. Bei dieser werden zusammen mit der Auswertung von Objektinformationen auch die Kalibrierungsparameter der Kamera bestimmt. Als Grundlage für die Bildauswertung bzw. Kalibrierung dient dabei ein analytisches Modell. Eine andere Möglichkeit ist die Kamerakalibrierung mittels eines Testfeldes. Ein solches Testfeld besitzt signalisierte, z.B. beleuchtete Objektpunkte, deren Koordinaten bzw. Maßstabsinformationen bekannt sind. Es hat meistens eine räumliche Ausdehnung und wird unter verschiedenen Aufnahmekonfigurationen, d.h. Stellungen der Kamera relativ zum Testfeld, fotografiert. Ebenso wie die Methode der Simultankalibrierung basiert auch die Methode der Kamerakalibrierung mittels Testfeld auf einem analytischen Modell. In diesem Modell werden die Parameter der Orientierungen aus dem funktionalen Zusammenhang von Objektinformationen und Bildkoordinaten bestimmt. Dazu benötigt man geeignete Schnittgeometrien der Abbildungsstrahlen bzw. der Aufnahmekonfigurationen und der räumlichen Ausdehnung des Feldes mit den Objektpunkten. Je größer und insbesondere tiefer der für die Objektpunkte zur Verfügung stehende Raum angelegt ist, desto genauer und zuverlässiger kann die Kamera kalibriert werden. Dabei ist es auch vorteilhaft, für redundante Messungen zu sorgen, d.h. mehr Beobachtungen zu sammeln als Parameter zu bestimmen sind. Mittels eines Ausgleichsverfahrens können dann die Parameter mit höherer Zuverlässigkeit bestimmt werden. In der Geodäsie hat sich als Ausgleichsverfahren die Methode der kleinsten Quadrate durchgesetzt.

Grundlage eines jeden analytischen Modells bilden dabei die sogenannten Kollinearitätsgleichungen, die den funktionalen Zusammenhang zwischen den Koordinaten  $(X, Y, Z)$  des Objektpunktes in einem sogenannten äußeren Raum und den Bildkoordinaten  $(x', y', -c_k)$  des Bildes des Objektpunktes im sogenannten inneren Raum – einem Koordinatensystem, welches die innere Orientierung der Kamera beschreibt – herstellen.  $c_k$  ist die sogenannte Kamerakonstante, die von ihrem Betrag her vergleichbar mit der Brennweite  $f$  der Abbildungsoptik ist. Die Kollinearitätsgleichungen lauten für die  $x'$ - und  $y'$ -Bildkoordinaten im inneren Koordinatensystem

$$x' = x'_0 - c_K \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x'$$

$$y' = y'_0 - c_K \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y'$$

Die Koordinaten  $(X_0, Y_0, Z_0)$  geben dabei die Lage des Augpunktes oder Projektionszentrums  $O$ , welches auch gleichzeitig der Ursprung des Bildkoordinatensystems ist, im äußeren Raum an. Die Größen  $r_{ij}$  mit  $i, j=1, \dots, 3$  sind Elemente einer Rotationsmatrix  $R$ , die die Drehung des Bildkoordinatensystems gegenüber dem äußerem Koordinatensystem beschreibt. Auf diese Weise lassen sich die Koordinaten  $(X, Y, Z)$  eines Punktes im Außenraum in Bildkoordinaten transformieren. Umgekehrt lassen sich allerdings, ohne daß man weitere Informationen wie z.B. die Entfernung des Objektpunkts zum Aufnahmestandpunkt der Kamera kennt, aus Bildkoordinaten keine Objektkoordinaten berechnen. Die Koordinaten  $x'_0$  und  $y'_0$  beschreiben die Lage des sogenannten Bildhauptpunktes in der Bildebene der Kamera. Dieser wird definiert durch den Durchstoßpunkt in der lotrechten Verbindung der Bildebene mit dem Projektionszentrum  $O$ . Die Optik der abbildenden Kamera wird einerseits durch die Kamerakonstante  $c_K$  und andererseits durch die Verzeichnungsparameter  $\Delta x'$ ,  $\Delta y'$ , die durch die Abbildungsfehler der Kameraoptik ins Spiel kommen, berücksichtigt.

Wird nun eine Kamera in einem Vermessungsgerät wie beispielsweise einem Tachymeter oder Theodoliten verwendet, so lassen sich die bekannten photogrammetrischen Verfahren nicht ohne weiteres verwenden, da neben den Parametern der inneren und äußeren Orientierung noch vom Vermessungsgerät abhängige Parameter und eventuell Fehler in deren Achsen hinzukommen. Bei Verwendung eines Tachymeters müssen zusätzlich außerdem die Richtungsmessungen am Instrument in die Kalibrierung einbezogen werden. Auch dazu gibt es im Stand der Technik Ansätze, der nächstliegende Stand der Technik dürfte in dem Artikel von Y. D. Huang, „Calibration of the Wild P32 Camera using the Camera-ON-Theodolite method“, erschienen in Photogrammetric Record, 16(91), von 1998 beschrieben sein. Huang verbindet einen oder maximal zwei in unterschiedlicher Entfernung zum Instrument – hierunter ist das System aus Vermessungsgerät und Kamera zu verstehen – angeordnete Referenzpunkte, die mit der zu kalibrierenden Kamera in unterschiedlichen Instrumentenrichtungen, d.h. bei verschiedenen Winkelkombinationen von am Instrument einzustellenden Horizontal- und Vertikalwinkeln, beobachtet werden. Da Huang einen Theodoliten verwendet, muß zusätzlich die Strecke zwischen den beiden Punkten bzw. die Strecke zwischen den Punk-

ten und dem Instrument bekannt sein. Nachteilig ist jedoch, daß bei dem Verfahren von Huang die Instrumentenfehler, wie Kippachsenfehler und Seitenkollimationsfehler, unberücksichtigt bleiben. Je nach Größe dieser Fehler sind daher auch die Fehler in der Kalibrierung größer, was sich in einer verminderten Genauigkeit des gesamten Instruments niederschlägt.

Ausgehend von diesem Stand der Technik liegt der Erfindung daher die Aufgabe zugrunde, ein verbessertes Verfahren zur Kalibrierung eines mit einer Kamera mit ortsauflösendem Flächendetektor ausgestatteten Vermessungsgeräts zu entwickeln.

Diese Aufgabe wird bei einem Verfahren der eingangs beschriebenen Art dadurch gelöst, daß für jede der Winkelkombinationen zunächst eine zweite Lage eingestellt wird, indem das Vermessungsgerät um 200 gon um eine vertikale Stehachse gedreht und auf einen Horizontalwinkel  $H_{z_{II}}$  eingestellt wird und die Kamera um eine horizontale Kippachse gedreht und auf einen Vertikalwinkel  $V_{II}$  mit  $V_{II} = 400 \text{ gon} - V_I$  eingestellt wird. Dabei entspricht ein Vertikalwinkel von 0 gon einer Zielung in den Zenit. In der zweiten Lage werden dann ebenfalls die Bildkoordinaten des Referenzpunktes  $P_i$  bestimmt und in Zuordnung zur jeweiligen Winkelkombination ( $H_{z_{II}}$ ,  $V_{II}$ ) gespeichert. Die Kalibrierung erfolgt schließlich unter Verwendung der für die Winkelkombinationen in beiden Lagen gespeicherten Daten, d.h. der in Zuordnung zur jeweiligen Winkelkombination gespeicherten Bildkoordinaten.

In der ersten Lage sind am Gerät ein Horizontalwinkel  $H_{z_I}$  und ein Vertikalwinkel  $V_I$  eingestellt. Zum Einstellen der zweiten Lage wird das Instrument zunächst aus dem ursprünglich eingestellten Horizontalwinkel  $H_{z_I}$  um 200 gon, also einen Halbkreis, gedreht und so der Horizontalwinkel  $H_{z_{II}}$  in der zweiten Lage eingestellt. Anschließend wird der Vertikalwinkel  $V_{II}$  entsprechend der Beziehung

$$V_{II} = 400 \text{ gon} - V_I$$

eingestellt, wobei berücksichtigt ist, daß sich die Skala, an der der Vertikalwinkel eingestellt wird, bei der Drehung um die Stehachse mitdreht. Der Nullpunkt der Vertikalwinkelskala, d.h. der Punkt, an dem der Vertikalwinkel 0 gon beträgt, wurde dabei in den Zenit gelegt, bei einer Einstellung auf diesen Winkel weist die Optik der Kamera also senkrecht nach oben.

Dabei ist es egal, ob für jede der Winkelkombinationen in der ersten Lage unmittelbar nach deren Vermessung die zweite Lage eingestellt wird, oder ob erst alle Messungen

in der ersten Lage durchgeführt werden, und im Anschluß alle Messungen in der zweiten Lage. Im allgemeinen ist letztere Möglichkeit zu bevorzugen, da das Gerät dann nicht so stark durch weite Drehungen beansprucht wird.

Zusammen mit einem erweiterten mathematischen Modell läßt sich so eine höhere Genauigkeit bei der Kalibrierung erzielen. Grundlage bilden auch hier die Kollinearitätsgleichungen, jedoch wird sowohl das Projektionszentrum als auch der Objektpunkt im äußeren Raum in polaren Koordinaten beschrieben. Die sich zusätzlich durch die Verwendung des Vermessungsgeräts ergebenden Parameter werden im photogrammetrischen Modell teilweise durch weitere Rotationsmatrizen berücksichtigt, die in der Multiplikation die Gesamtdrehmatrix ergeben. Da die Kamera mit dem Meßgerät fest verbunden ist, unterliegt die Kamera bei Rotationen des Meßgeräts um die vertikale Stehachse bzw. die horizontale Kippachse ebenfalls Rotationen. Da das Meßgerät über ein Winkelmeßsystem verfügt, werden zwei Drehwinkel direkt gemessen. Weiterhin müssen konstante Winkelablagen, die die Wirkungen von Rotationen haben, berücksichtigt werden. Dazu zählen zum einen der Kippachsenfehler des Instruments, der auftritt wenn die Kippachse des Instruments nicht rechtwinklig zur Stehachse ist, und zum anderen eine seitliche Ablage des Projektionszentrums von der theoretischen Zielachse, deren Wirkung dem eines Seitenkollimationsfehlers entspricht.

In einer bevorzugten Ausgestaltung der Erfindung werden die Referenzpunkte  $P_i$  in verschiedenen Entfernungen vom Vermessungsgerät vorgegeben. Auf diese Weise kann die Genauigkeit der Kalibrierung weiter erhöht werden: Je weiter die Punkte in der räumlichen Tiefe voneinander entfernt sind, desto genauer arbeitet das Verfahren.

In einer besonders bevorzugten Ausgestaltung des Verfahrens werden die Referenzpunkte  $P_i$  mittels eines Kollimators mit einer zwischen dem Kollimatorobjektiv und dessen Brennpunkt verschiebbaren Meßmarke vorgegeben. Im Stand der Technik werden Kollimatoren häufig in Verbindung mit geodätischen Instrumenten bezüglich Justierungs- und Meßvorgängen eingesetzt. Sie sind dadurch gekennzeichnet, daß sie paralleles Licht abstrahlen und einen Punkt, der optisch im Unendlichen liegt, in endlicher Entfernung erzeugen. Die Meßmarke - ein Strichkreuz, ein Spalt oder eine anders geformte Blende - des Kollimators sitzt dazu im Brennpunkt dessen Objektivs. Bei einem Kollimator mit Auszug kann die Meßmarke zwischen Kollimatorobjektiv und dem Brennpunkt des Objektivs verschoben werden. Die Verschiebung läßt sich in der Regel mikrometergenau ablesen. Aus dem Verschiebebetrag gegenüber dem Brennpunkt und der Brennweite kann die Bildweite des virtuell aufrechten Bildes bestimmt werden. Dieses Bild wird nun mit dem zu kalibrierenden Meßgerät beobachtet. Aus der Summe der Entfernung von der Stehachse des Meßgerätes zur Hauptbrennebene des Kollimatorob-



jektivs und der Bildweite ergibt sich die endgültige Entfernung zwischen dem Meßgerät und dem virtuellen, vom Kollimator erzeugten Referenzpunkt. Mit Hilfe eines Kollimators lassen sich so auch Referenzpunkte in großen Entfernungen wie 2000 m und mehr erzeugen, wohingegen Referenzpunkte in solcher Entfernung ohne einen Kollimator nur schwer zu realisieren sind: Ist es schon schwer, eine solche Strecke ohne Sicht Hindernisse zu finden, so können erschwerend noch Lufterscheinungen wie Verwirbelungen hinzukommen, die die Messung beeinflussen. Hinzu kommt, daß für verschieden große Entfernungen verschieden große Referenzpunkte benötigt werden, um einen in jeweils etwa gleich großen Bildpunkt zu erhalten. Die Kalibrierung mit Hilfe eines Kollimators ist daher besonders für die Kalibrierung beim Hersteller nach Produktion des Gerätes geeignet, da sie wenig Platz beansprucht und weitestgehend automatisiert werden kann. Schließlich wird so auch die Kalibrierung von den Umgebungsbedingungen unabhängig gemacht, da der ortsauflösende Flächendetektor der Kamera, welcher in der Regel aus sogenannten Pixeln zusammengesetzt ist, häufig vom Umgebungslicht beeinflußt werden kann.

In einer anderen Ausgestaltung des Verfahrens werden die Winkelkombinationen gemäß eines Rasters vorgegeben. Das Raster wird dabei so gewählt, daß bei der Einstellung der Positionen entsprechend der Winkelkombinationen die Referenzpunkte möglichst homogen über die gesamte Bildebene abgebildet werden.

In einer weiteren Ausgestaltung des Verfahrens wird für jede der gemäß einer Position im Raster vorgegebenen Winkelkombinationen bei der Einstellung des Vermessungsgeräts auf diese Position eine zufällige Abweichung von dieser Position bestimmt und berücksichtigt. Auf diese Weise kann ein möglicherweise vorhandener systematischer Fehler, der sich erst in der Ausgleichsrechnung bemerkbar machen würde, verringert werden. Dabei ist es sinnvoll, die Abweichungen nicht größer als den halben Abstand zwischen zwei Positionen im Raster in der jeweiligen Richtung werden zu lassen, da sonst die homogene Verteilung der Bilder der Referenzpunkte wesentlich gestört werden kann. Die zufälligen Abweichungen zu jeder Winkelkombination müssen dabei in der ersten und zweiten Lage nicht notwendigerweise gleich sein, sondern können getrennt bestimmt werden. Die Bestimmung kann beispielsweise rechnerisch mittels einer Pseudo-Zufallszahlenfolge erfolgen.

Verwendet man ein Tachymeter, so ist es außerdem vorteilhaft, die Entfernung zu den Referenzpunkten  $P_i$  mittels elektrooptischer Distanzmessung zu bestimmen.

Die Erfindung soll im folgenden anhand eines Ausführungsbeispiels in Form eines Tachymeters näher erläutert werden. In den dazugehörigen Zeichnungen zeigt

- Fig.1 schematisch den Aufbau eines Tachymeters,
- Fig.2 eine Darstellung der beiden Koordinatensysteme und der wichtigsten Rotationen in einer perspektivischen Ansicht,
- Fig.3 eine Darstellung der wesentlichen Bezüge in einer horizontalen Ebene, die die Kippachse enthält, und
- Fig.4 eine Darstellung der wesentlichen Bezüge in einer vertikalen Ebene, die die Stehachse enthält.

Fig.1 zeigt zunächst schematisch den Aufbau eines Tachymeters, der zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens verwendet werden kann. Auf einem feststehenden Unterteil 1, an das sich nach unten ein Dreifuß anschließt, ist ein Oberteil 2 – hier im Schnitt dargestellt – über ein Lager 3 um die Stehachse drehbar gelagert. Das Oberteil 2 kann über einen Horizontalantrieb 4 gedreht werden. Der an einem Horizontalteilkreis 5 eingestellte Winkel  $H_z$  bzw.  $H_{z''}$  wird über einen Horizontalabtastkopf 6 automatisch registriert und an eine – nicht gezeigte – Steuer- und Auswerteeinheit übermittelt. Außerdem ist ein Fernrohrkörper 7 mit der Funktion einer Kamera dargestellt, der über ein Lager 8, welches mit dem Oberteil 2 verbunden ist, um die Kippachse drehbar gelagert ist. Der Fernrohrkörper 7 enthält ein Objektiv 9, eine Fokussierlinse und einen Flächendetektor, beispielsweise ein CCD-Array. Mittels Vertikaltrieb 10 kann der Fernrohrkörper 7 gedreht werden. Der an einem Vertikalteilkreis 11 eingestellte Winkel  $V_z$  bzw.  $V_{z''}$  wird über einen Vertikalabtastkopf 12 an die Steuer- und Auswerteeinheit übermittelt.

In Fig.2 ist das Bildkoordinatensystem mit den Koordinaten  $(x', y', -c_k)$  im Verhältnis zum übergeordneten Koordinatensystem  $(X, Y, Z)$  dargestellt. Der Ursprung des übergeordneten Koordinatensystems ist hier in den Mittelpunkt des Horizontal-Teilkreises, an dem der horizontale Winkel am Tachymeter bzw. Theodoliten abgelesen wird, eingezeichnet, da dieses seine Lage im Raum nicht verändert, liegt jedoch tatsächlich im Schnittpunkt (Tachymeterzentrum) der Steh-, Kipp- und Zielachse. Die Z-Achse des übergeordneten Systems fällt mit der Stehachse des Instruments und die Y-Achse mit der Nullrichtung am Horizontalteilkreis zusammen. Der Ursprung des Bildkoordinatensystems ist der Bildhauptpunkt  $H'$  mit den Koordinaten  $x'_0$  und  $y'_0$  in der Bildebene, der durch den Durchstoßpunkt einer auf der Bildebene senkrechten Verbindungslinie zum Projektionszentrum O definiert wird. Eingezeichnet sind außerdem drei Rotationen mit Winkeln  $\kappa$ ,  $\phi$ ,  $\omega$ , die von Tachymeterfehlern und -richtungen unabhängig sind und im

wesentlichen mit dem Einbau der Kamera in Bezug auf die Zieloptik verbunden sind. Sie werden durch die Rotationsmatrix

$$R_{\omega}(\omega) \cdot R_{\phi}(\phi) \cdot R_{\kappa}(\kappa) = \begin{bmatrix} \cos(\phi)\cos(\kappa) & -\cos(\phi)\sin(\kappa) & \sin(\phi) \\ \cos(\omega)\sin(\kappa) + \sin(\omega)\sin(\phi)\cos(\kappa) & \cos(\omega)\cos(\kappa) - \sin(\omega)\sin(\phi)\sin(\kappa) & -\sin(\omega)\cos(\phi) \\ \sin(\omega)\sin(\kappa) - \cos(\omega)\sin(\phi)\cos(\kappa) & \sin(\omega)\cos(\kappa) + \cos(\omega)\sin(\phi)\sin(\kappa) & \cos(\omega)\cos(\phi) \end{bmatrix}$$

beschrieben. Die Entfernung von dem Bildhauptpunkt  $H'$  und dem Projektionszentrum  $O$  ist die Kamerakonstante  $c_{\kappa}$ .

Die Z-Achse schneidet die Kippachse, um die die vertikalen Drehungen stattfinden. Durch den Kippachsenfehler weicht die reale Kippachse, als durchgezogene Linie in Fig.2 eingezeichnet, von der theoretischen Kippachse, als gestrichelte Linie eingezeichnet, ab. Der Ablagewinkel von der Nichtorthogonalität der Kippachse zur Instrumenten-Stehachse wird mit  $i$  bezeichnet. Auch die tatsächliche Zielachse, die der Aufnahmeerrichtung entspricht und hier als  $-z'$ -Achse des Bildkoordinatensystems eingezeichnet ist, weicht von der theoretischen Zielachse, die gestrichelt ebenfalls eingezeichnet ist, ab. Da das Projektionszentrum  $O$  außerdem nicht mit dem Instrumentenzentrum, welches durch den Schnittpunkt von Steh- und Kippachse definiert wird, zusammenfällt, müssen weitere Parameter eingeführt werden, um das Modell zu vervollständigen und die vollständige Rotationsmatrix zu erhalten: Der Parameter  $S_0$  beschreibt die Schrägstrecke vom Instrumenten- zum Projektionszentrum  $O$ . Der Parameter  $c_0$  beschreibt den Ablagewinkel des Projektionszentrum  $O$  von der orthogonal zur Kippachse stehenden theoretischen Zielachse, und der Parameter  $z_0$  beschreibt den Ablagewinkel des Projektionszentrums  $O$  in der Vertikalen bezüglich einer orientierten theoretischen Zielachse. Weitere wichtige Größen sind in Fig.3 und Fig.4 erläutert. In Fig. 3 ist zunächst der am Instrument abgelesene Horizontalwinkel  $HZ_{VII}$  eingezeichnet, wobei der Index „I/II“ bedeutet, daß dies sowohl der in der ersten Lage abgelesene Horizontalwinkel  $HZ_I$ , als auch der in der zweiten Lage abgelesene Winkel  $HZ_{II}$  sein kann. Der Wert des Horizontalwinkels  $HZ_{VII}$  hängt von der Lage des Abtastkopfes im Instrument ab, die hier durch die Strecke  $a$  gekennzeichnet ist. Der Winkel  $c_f$  ist der Ablagewinkel der mechanischen Fernrohrkörperachse von der theoretischen Zielachse, d.h. von der Orthogonalität zur Kippachse. Die mechanische Fernrohrkörperachse wird definiert durch die Zentrierungen der optischen Bauteile wie Objektiv, Schiebelinse und Okular. Bei ideal zentrierter und aufgefädelter Optik fällt diese Achse mit der optischen Achse des Fernrohrkörpers zusammen.  $c_f$  wirkt gleich einem klassischen Seitenkollima-

tionsfehler und ausschließlich auf die Kamera, nicht auf das Projektionszentrum. Ein-gezeichnet ist außerdem ein Objektpunkt P, dessen Bildpunkt in der Bildebene mit P' und den Koordinaten  $(x'_p, y'_p, -c_k)$  bezeichnet ist. In der die vertikale Ebene zeigenden Fig.4 schließlich ist die bezüglich der Stehachse abgelesene Vertikalrichtung  $V_{vII}$  in Form eines Winkels dargestellt. Auch hier bedeutet der Index „I/II“, daß es sich sowohl um den in der ersten Lage abgelesenen Vertikalwinkel  $V_I$ , als auch um den in der zweiten Lage abgelesenen Vertikalwinkel  $V_{II}$  handeln kann.

Mit diesen Bezeichnungen ergeben sich die Koordinaten des Projektionszentrums O zu

$$O = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_0 \cdot \sin(V_{I/II} + z_0) \cdot \sin \left( Hz_{I/II} + \frac{c_0}{\sin(V_{I/II} + z_0)} + i \cdot \cot(V_{I/II} + z_0) \right) \\ S_0 \cdot \sin(V_{I/II} + z_0) \cdot \cos \left( Hz_{I/II} + \frac{c_0}{\sin(V_{I/II} + z_0)} + i \cdot \cot(V_{I/II} + z_0) \right) \\ S_0 \cdot \cos(V_{I/II} + z_0) \end{bmatrix}$$

Diese werden dann in den Kollinearitätsgleichungen verwendet.

Um eine Rotationsmatrix für die Gesamtdrehung des Bildkoordinatensystems der in das Instrument eingebauten Kamera zu erhalten, werden nacheinander sieben Rotationen ausgeführt. Die erste Rotation ist die der Alhidade, d.h. des Geräts um die Stehachse. Diese Rotation ist indirekt mit dem Winkel  $H_{z_{vII}}$  verknüpft. Dabei sind jedoch die Einflüsse eines möglichen Kippachsenfehlers vom Instrument, der durch den Winkel  $i$  beschrieben wird, und der Ablage der Fernrohrkörperachse von der Orthogonalität zur Kippachse,  $c_F$ , zu berücksichtigen. Damit ergibt sich dann ein verbesserter Horizontalwinkel  $H_{z_K}$  mit

$$H_{z_K} = H_{z_{I/II}} + \frac{c_F}{\sin(V_0)} + i \cdot \cot(V_0)$$

$V_0 = V_{vII} + z_0$  bezeichnet den Vertikalwinkel des Projektionszentrums. Wenn die Drehung um die  $z'$ -Achse des Bildkoordinatensystems mit dem Winkel  $-H_{z_K}$  erfolgt, ergibt sich folgende Rotationsmatrix:

$$R_x(Hz_K) = \begin{bmatrix} \cos(-Hz_K) & \sin(-Hz_K) & 0 \\ -\sin(-Hz_K) & \cos(-Hz_K) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Nachdem die Drehung der Alhidade um die Stehachse abgeschlossen wurde, wirkt ohne weitere mechanische Bewegung ein Kippachsenfehler als Rotation auf das Bildkoordinatensystem.

Dieser wird als zweite Drehung um die bei der ersten Rotation mitgedrehte  $y'$ -Achse mit dem Winkel  $i$  durchgeführt. Unter der Annahme, daß die Kippachse in dieser Konstellation etwa parallel zur  $x'$ -Achse ist, ergibt sich für die Rotationsmatrix:

$$R_\phi(i) = \begin{bmatrix} \cos(i) & 0 & \sin(i) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(i) & 0 & \cos(i) \end{bmatrix}$$

Die nächste zu berücksichtigende Drehung ist die des Bildkoordinatensystems um den Vertikalwinkel. Diese Drehung kann unmittelbar mit der am Instrument gemessenen Richtung  $V_{\text{m}}$  unter Berücksichtigung der Korrektur  $z_0$  in Verbindung gebracht werden. Das Bildkoordinatensystem wird grundsätzlich um 200 gon und die  $x'$ -Achse gedreht. Die Rotationsmatrix lautet:

$$R_w(V_0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(200\text{gon} - V_0) & -\sin(200\text{gon} - V_0) \\ 0 & \sin(200\text{gon} - V_0) & \cos(200\text{gon} - V_0) \end{bmatrix}$$

Die nächste wiederum nur intern wirkende Drehung erfolgt durch die Ablage  $c_f$  der Fernrohrkörperachse. Die Rotationsmatrix lautet in diesem Fall:

$$R_\phi(c_F) = \begin{bmatrix} \cos(c_F) & 0 & \sin(c_F) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(c_F) & 0 & \cos(c_F) \end{bmatrix}$$

Daran an schließen sich die vorhin schon angesprochenen drei ebenfalls nur internen Rotationen um die Winkel  $\kappa$ ,  $\phi$  und  $\omega$ . Die gesamte Drehmatrix  $R$  ergibt sich dann aus der Aneinandermultiplikation der Drehmatrizen in der richtigen Reihenfolge zu

$$R = R_\kappa(Hz_\kappa) \cdot R_\phi(k_0) \cdot R_\omega(V_0) \cdot R_\phi(c_F) \cdot R_\omega(\omega) \cdot R_\phi(\phi) \cdot R_\kappa(\kappa)$$

Auf diese Weise gelingt es, eine beliebig in das Instrument integrierte Kamera unter Berücksichtigung instrumentenspezifischer Größen und unter Zuhilfenahme einer Richtungsmessung in ihren Drehungen zu beschreiben. Die Elemente  $r_{ij}$  der Drehmatrix  $R$  werden ebenfalls als Eingangsgrößen für die Kollinearitätsgleichungen verwendet.

Benutzt man zur Kalibrierung einer Kamera mit einer Brennweite von 300mm, einem festen Fokus bei 100m und ein Instrument mit einer Winkelmessgenauigkeit von 1" drei Punkte in einer Entfernung von z.B. 20m, 80m und 500m, in jeder Lage insgesamt 48 Winkelkombinationen in einem Raster aus 8 x 6 Positionen sowie 30-facher Vermessung in einer Winkelkombination, wobei die zufälligen Abweichungen in keinem Fall größer als 0.05 *Pixel* sind, kann man das Gerät auf eine Genauigkeit von annähernd 1" in der vertikalen und in der horizontalen Richtungsmessgenauigkeit kalibrieren. Herkömmliche Kalibrierungsverfahren versagten bisher bei dem Versuch langbrennweitige Kameras zu kalibrieren.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, daß bei dieser Art der Kalibrierung aus den Bildkoordinaten auch instrumentelle Richtungen abgeleitet werden können. Auf diese Weise wird eine Richtungsmessung außerhalb der Zielachse möglich. Durch die Kalibrierung kann unter jeder beliebigen Stellung des Instruments das Projektionszentrum in kartesischen Koordinaten berechnet werden. Mit der Formel

$$P_T' = \bar{O} + R \cdot \begin{bmatrix} x_P' - \Delta x' \\ y_P' - \Delta y' \\ -c_K \end{bmatrix}$$

ist es möglich, gemessene Bildkoordinaten in das Koordinatensystem des Tachymeters zu transformieren.  $P_T'$  ist ein Vektor mit den in das Tachymeterkoordinatensystem transformierten gemessenen Bildkoordinaten. Das Projektionszentrum  $O$  und der Punkt  $P_T'$  sind beide in Koordinaten bezüglich des Tachymeters bekannt und definieren einen Abbildungsstrahl  $g$ . Da dieser nicht das Tachymeterzentrum schneidet, muß für die strenge Richtungsableitung, die sich auf das Tachymeterzentrum bezieht, eine Entfernung (Nährungsentfernung) für den Objektpunkt  $P$  zum Tachymeterzentrum angegeben werden. Diese dient als Radius für eine Kugel, die um das Tachymeterzentrum aufgespannt und mit dem Abbildungsstrahl  $g$  geschnitten wird. Es entstehen dadurch zwei Koordinatentripel, die abhängig von der Lage des Fernrohrkörpers mit der Funktion einer Kamera zur Richtungsberechnung benutzt werden können. Je näher das Tachymeterzentrum am Abbildungsstrahl liegt, desto unabhängiger wird dieses Verfahren von der angegebenen Entfernung.

Vorangehend wurde das Verfahren zwar an einem Tachymeter erläutert, jedoch läßt es sich bei anderen Vermessungsgeräten wie Theodoliten oder sogenannten Scannern ebenfalls anwenden, sofern diese über die hier beschriebenen Voraussetzungen verfügen.

Mit der so durchgeführten Kamerakalibrierung läßt sich auch die photogrammetrische Zielachse definieren, und zwar als die Verbindungsgerade des Projektionszentrums  $O$  mit dem Instrumentenzentrum, welches durch den Schnittpunkt von Kipp- und Stehachse gebildet wird. Diese Zielachse ist allerdings nicht mit der in Fig. 3 eingezeichneten tatsächlichen Zielachse identisch. Der Durchstoßpunkt der photogrammetrischen Zielachse in der Bildebene bestimmt die Position eines Strichkreuzes, bei dem der klassische Seitenkollimations- und Höhenindexfehler über die Entfernung konstant ist. Die Ablagen des Projektionszentrums in Seite und Höhe können, falls diese nicht in der Parameterschätzung bestimmt wurden, mit demjenigen Pixel gemessen werden, bei dem sich der klassische Seitenkollimations- und Höhenindexfehler über die Entfernung nicht ändert.

Würde man einen Objektpunkt mit einem auf diese Weise definierten Strichkreuz anvisieren, so lägen Strichkreuz, Tachymeterzentrum, Projektionszentrum O und Objektpunkt P auf einer Geraden, wobei diese Gerade mit einem photogrammetrischen Abbildungsstrahl identisch ist.

Die Position des Strichkreuzes, die in herkömmlichen Geräten als der Punkt in der Bildebene definiert ist, in dem Seitenkollimations- und Höhenindexfehler gleich Null sind, läßt sich in der gleichen Weise auch einem Pixel auf der detektierenden Fläche der Kamera zuordnen, wobei dieses bei einer weniger gut zentrierten Optik im ungünstigsten Fall entfernungsabhängig sein kann.



### Bezugszeichenliste

1	Unterteil
2	Oberteil
3	Lager
4	Horizontalantrieb
5	Horizontalteilkreis
6	Horizontalabtastkopf
7	Fernrohrkörper
8	Lager
9	Objektiv
10	Vertikalantrieb
11	Vertikalteilkreis
12	Vertikalabtastkopf

Trimble Jena GmbH

Jena, den 16. Dezember 2003

u. Z.: Pat 9074/55 DE

### Patentansprüche

1. Verfahren zur Kalibrierung eines mit einer Kamera mit ortsauflösendem Flächen-detektor ausgestatteten Vermessungsgeräts, bei dem
  - mit dem Vermessungsgerät nacheinander vorgegebene Referenzpunkte ( $P_i$ ), mit  $i=1, \dots, N$  und einer natürlichen Zahl ( $N$ ), angezielt werden,
  - für jeden Referenzpunkt ( $P_i$ ) die Entfernung bestimmt wird und in einer ersten Lage für verschiedene vorgegebene und am Vermessungsgerät einzustellende Winkelkombinationen von Horizontalwinkeln ( $H_{z_i}$ ) und Vertikalwinkeln ( $V_i$ ) jeweils die Bildkoordinaten des Bildes des Referenzpunktes ( $P_i$ ) in der Bildebene der Kamera bestimmt und in Zuordnung zur jeweiligen Winkelkombination ( $H_{z_i}, V_i$ ) gespeichert werden,
  - und mittels eines Ausgleichsverfahrens anhand der gespeicherten Daten die Position der Kamera relativ zum Vermessungsgerät bestimmt wird,
  - dadurch gekennzeichnet, daß für jede der Winkelkombinationen eine zweite Lage eingestellt wird, indem das Vermessungsgerät um 200 gon um eine vertikale Stehachse gedreht und auf einen Horizontalwinkel ( $H_{z_{ii}}$ ) eingestellt wird und die Kamera um eine horizontale Kippachse gedreht und auf einen Vertikalwinkel ( $V_{ii}$ ) mit  $V_{ii} = 400 \text{ gon} - V_i$  eingestellt wird, wobei ein Vertikalwinkel von 0 gon einer Zielung in den Zenit entspricht,
  - in der zweiten Lage ebenfalls die Bildkoordinaten des Bildes des Referenzpunktes ( $P_i$ ) bestimmt und in Zuordnung zur jeweiligen Winkelkombination ( $H_{z_{ii}}, V_{ii}$ ) gespeichert werden, und
  - die Kalibrierung unter Verwendung der für beide Lagen gespeicherten Daten erfolgt.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Referenzpunkte ( $P_i$ ) in verschiedenen Entfernungen zum Vermessungsgerät vorgegeben werden.

3. Verfahren nach einem der vorgenannten Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Referenzpunkte (P) mittels eines Kollimators mit einer zwischen dem Kollimatorobjektiv und dessen Brennpunkt verschiebbaren Meßmarke vorgegeben werden.
4. Verfahren nach einem der vorgenannten Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Winkelkombinationen gemäß eines Rasters vorgegeben werden.
5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß für jede der gemäß einer Position im Raster vorgegebenen Winkelkombinationen bei der Einstellung des Vermessungsgeräts auf diese Position eine zufällige Abweichung von dieser Position, die in jeder Richtung kleiner als der halbe Abstand zwischen zwei Positionen im Raster in dieser Richtung ist, bestimmt und berücksichtigt wird.
6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß für eine jede Winkelkombination die zufälligen Abweichungen in der ersten und zweiten Lage getrennt bestimmt werden.
7. Verfahren nach einem der vorgenannten Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Entfernung zu den Referenzpunkten (P) mittels elektrooptischer Distanzmessung bestimmt wird.



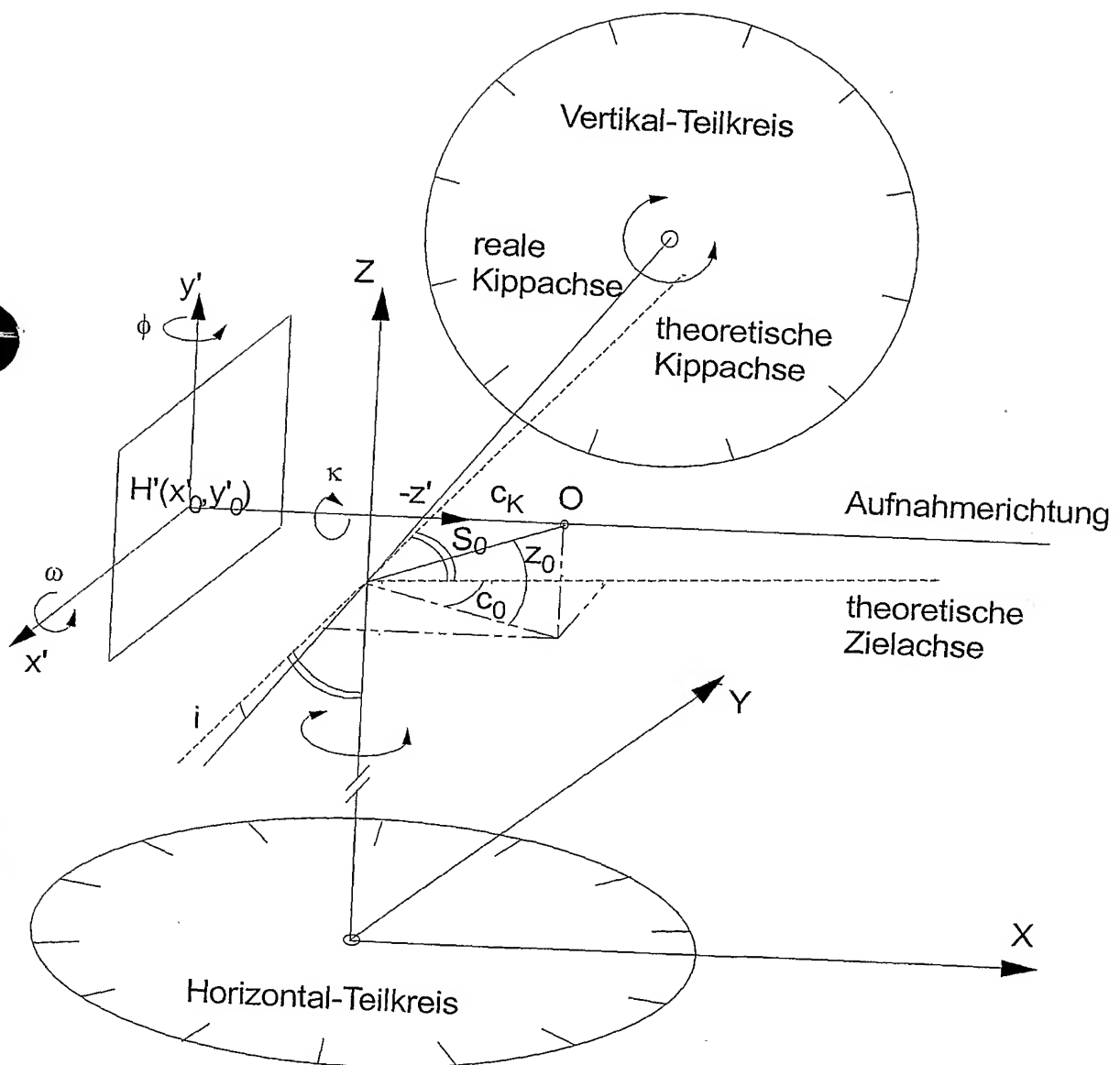


Fig.2

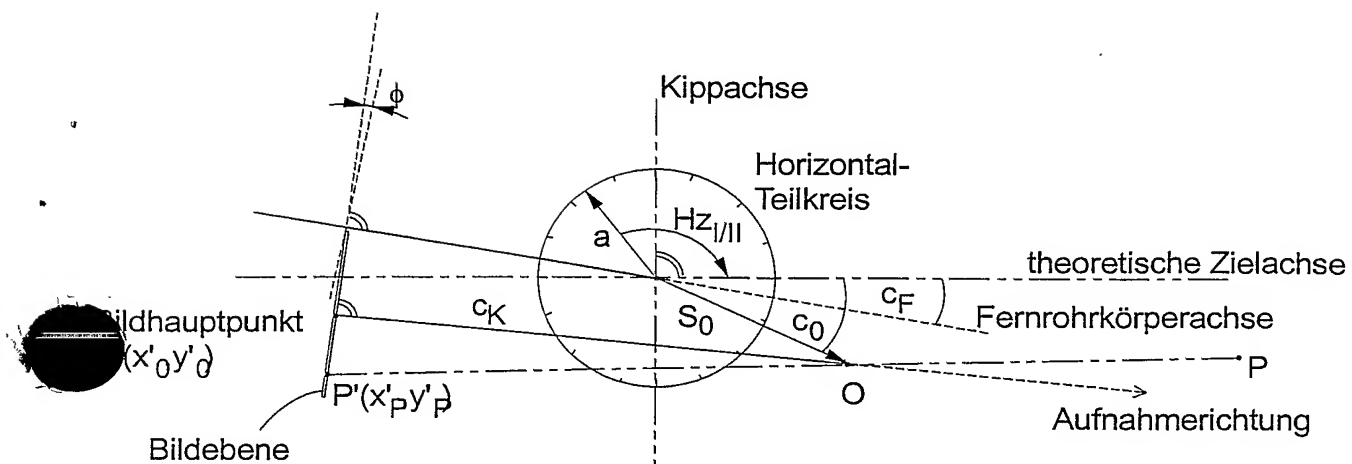


Fig.3

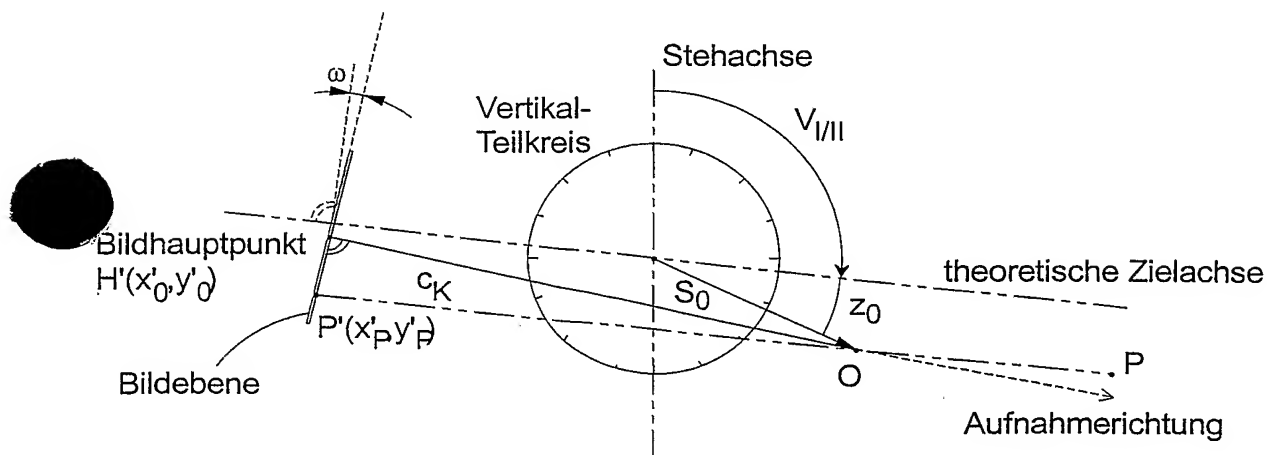


Fig.4